



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Betons Brudenergi: Maskine tol G_F-Forsøg

Jensen, Jens Kristian Jehrbo

Publication date:
1989

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Jensen, J. K. J. (1989). *Betons Brudenergi: Maskine tol G_F-Forsøg*. Institut for Bygningsteknik, Aalborg Universitet. R/ Nr. 8921

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

BETONKONSTRUKTIONERS STYRKE OG SEJHED
RAPPORT NR. 4

INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK

INSTITUTE OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING

AALBORG UNIVERSITETSCENTER · AUC · AALBORG · DANMARK

BETONKONSTRUKTIONERS STYRKE OG SEJHED
RAPPORT NR. 4

JENS KR. JEHRBO JENSEN
BETONS BRUDENERGI: MASKINE TIL G_F -FORSØG
JUNI 1989

ISSN 0902-7513 R8921

INDHOLD	side
INDHOLD	1
INDLEDNING	2
PRINCIP	3
Teori	3
Forsøgsemner	6
PRAKSIS	7
Udformning	7
Stivhedsberegning	8
Erfaringer	9
LITTERATUR	10
TEGNINGSOVERSIGT	11
TEGNINGER	

INDLEDNING

I denne rapport beskrives den maskine, der anvendes til bestemmelse af betons brudenergi. En betonbjælke med kærnv belastes, og samhørende værdier mellem kraft og deformation måles. Disse værdier danner grundlaget for beregning af betonens brudenergi udtrykt som en G_F -værdi ($\text{kN} \cdot \text{m}$) svarende til et areal under den optegnede kurve.

Teorien er opstillet af Hillerborg (1), og RILEM (4) har givet forslag til maskinens opbygning.

Maskinen er i sin første udgave fremstillet af medarbejdere ved laboratoriet for bærende konstruktioner. Der er løbende sket ændringer, således at der nu kan afprøves flere forskellige bjælkestørrelser.

Der er udarbejdet et sæt tegninger til maskinen af teknisk assistent Poul Skørbæk, og rapporten er renskrevet af overassistent Tove Jensen, begge fra Instituttet for Bygningsteknik.

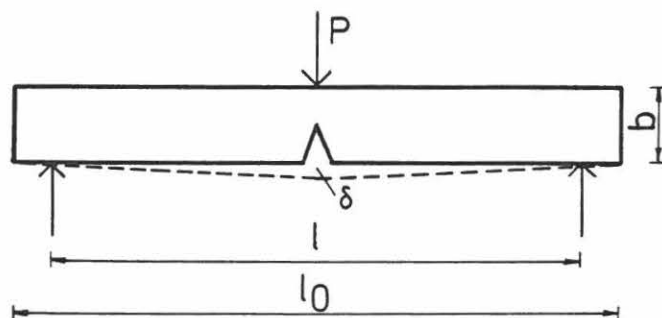
Tak for en god indsats!

Jens Kr. Jehrbo Jensen

PRINCIP

Teori

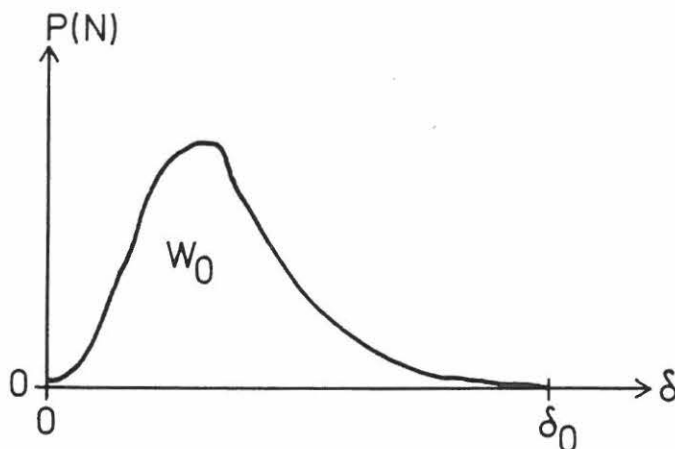
Til bestemmelse af betons brudenergi, G_F , foreslår RILEM (4), at man anvender en prøvningsmetode, hvor en betonbjælke med en kærv belastes midtpå som vist i princip på figur 1 (lodret plan).



Figur 1. Belastning af bjælke.

Bjælkens dimension i kraftens retning er b , og kærven har en dybde $= \frac{b}{2}$. Bjælkens højde er h og totallængde $= l_0$. Længden mellem understøtningerne er l .

Ved optegning af samholdende værdier mellem den øjeblikkelige værdi af kraften P og bjælkens deformation δ målt som flytningen af bjælkens underside (vist punkteret) fås en kurve, som afgrænser et areal W_0 , se figur 2.



Figur 2. Kraft-deformationskurve.

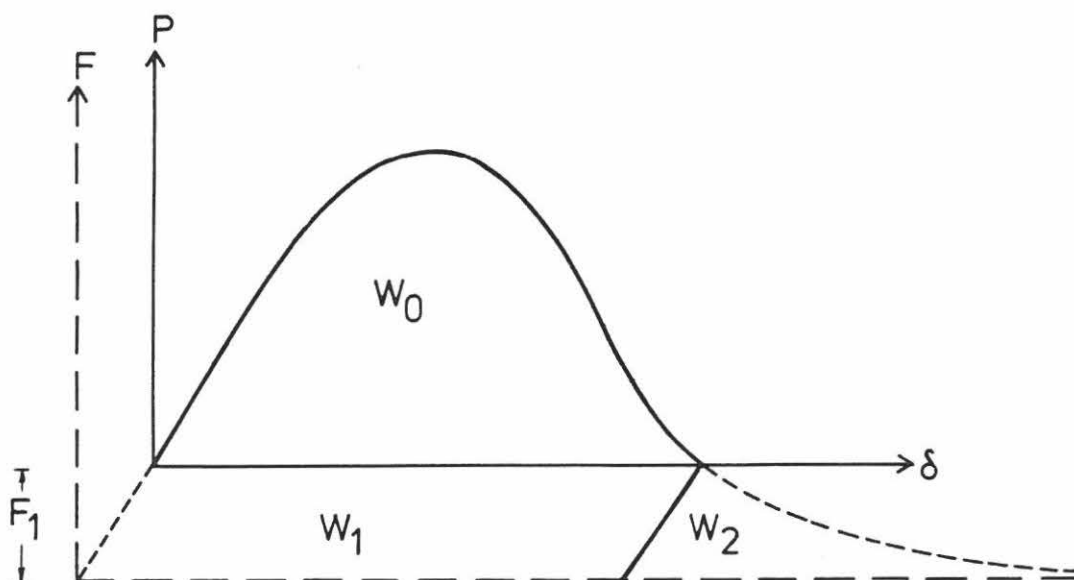
Brudenergien G_F ($N \cdot m^{-1}$) er defineret som

$$G_F = \frac{W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0}{A_{\text{brud}}}$$

- hvor W_0 = arealet under kurven, $N \cdot m$
 m = $m_1 + 2 m_2$, kg
 m_1 = vægten af bjælken mellem understøtningerne, kg
 m_2 = vægten af de dele af prøvningsudstyret (lejer), som følger med bjælken indtil brud, men som ikke tilhører selve maskinen, kg
 g = tyngdeaccelerationen, $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
 δ_0 = deformationen ved endelig brud, m
 A_{brud} = brudarealet defineret som arealet af brudzonen projiceret ind på et plan vinkelret på bjælkeaksen, m^2

Årsagen, til at det er nødvendigt at medregne bidraget fra bjælke og lejer til det samlede arbejde, er den, at belastningen foregår i lodret plan. Det betyder, at der sker en flytning af de to bjælkehalvdeles tyngdepunkter og tyngdepunktet for de lejer, som ligger på oversiden.

Kraft-deformationskurven på figur 2 afspejler kun forholdene for den rene kraft P med en bruddeformation δ_0 . Når der tages hensyn til disse ekstra kræfter, ser kurven ud som figur 3, hvor den oprindelige kurve suppleres med et bidrag (F_1) svarende til ekstrabelastningen. Det medfører, at kurven nu går asymptotisk til linien $F = 0$, svarende til at der ikke opstår egentligt brud.



Figur 3. Kraft-deformationskurve.

Hillerborg (1) angiver, at den totale absorberede energi W er givet ved

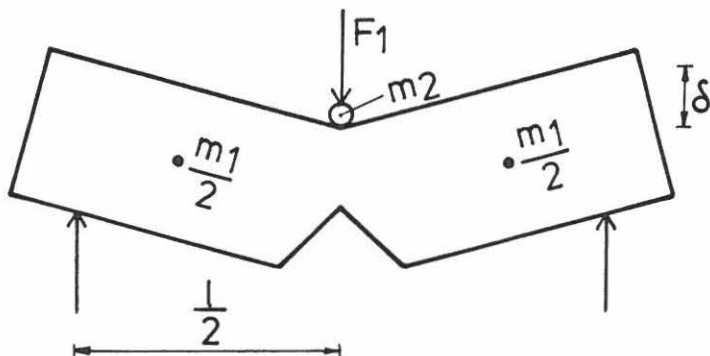
$$W = W_0 + W_1 + W_2 \quad \text{II}$$

svarende til arealet under hele kurven. Bidraget W_0 er tidligere omtalt, og bidraget W_1 kan bestemmes som

$$W_1 = F_1 \delta_0 \quad \text{III}$$

hvor F_1 er den centrale kraft, der udfører samme arbejde, som bjælkens egenvægt (m_1) og lejer (m_2) udfører ved prøvningen.

Figur 4 viser en situation, hvor bjælken er deformeret δ .



Figur 4. Bestemmelse af F_1 .

Med de sædvanlige betegnelser bliver

$$F_1 \cdot \delta = (2 \cdot \frac{m_1}{2} \cdot \frac{\delta}{2} + m_2 \cdot \delta) g$$

eller

$$\underline{F_1 = (m_2 + \frac{m_1}{2}) g}$$

Hvad angår W_2 vil kurven som nævnt gå asymptotisk til den vandrette akse. Petersson (3) foreslår, at

$$F(\delta) = \frac{c}{\delta^2}$$

og det betyder, at

$$\begin{aligned} W_2 &= \int_{\delta_0}^{\infty} F d\delta = \int_{\delta_0}^{\infty} \frac{c}{\delta^2} d\delta \\ &= \left[-\frac{c}{\delta} \right]_{\delta_0}^{\infty} = \underline{\underline{\frac{c}{\delta_0}}} \end{aligned}$$

Det medfører, at W_2 kan skrives som

$$\underline{W_2 = \frac{c}{\delta_0} \cdot \frac{\delta_0}{\delta_0} = F(\delta_0) \cdot \delta_0 = F_1 \delta_0 = \underline{W_1}}$$

Alt i alt

$$\begin{aligned}
 W &= W_0 + W_1 + W_2 \\
 &= W_0 + 2 W_1 \\
 &= W_0 + 2 \cdot F_1 \cdot \delta_0 \\
 &= W_0 + 2 \cdot \delta_0 \left(m_2 + \frac{m_1}{2} \right) g \\
 \underline{W &= W_0 + (m_1 + 2 m_2) g \cdot \delta_0}
 \end{aligned}$$

i overensstemmelse med formel I.

Hillerborg (2) nævner, at bidraget fra m_1 og m_2 udgør omkring halvdelen af det målte bidrag W_0 .

Forsøgsemner

RILEM (4) har på baggrund af opstillede krav til forsøgsudførelse, reproducerbarhed m.m. valgt at angive følgende dimensioner på prøvelegemerne, som det fremgår af tabel 1.

D_{\max} mm	bredde, b mm	højde, h mm	totallængde, l_0 mm	spændvidde, l mm
- 16	100 ± 5	100 ± 5	840 ± 10	800 ± 5
16 - 32	200 ± 5	100 ± 5	1190 ± 10	1130 ± 5
32 - 48	300 ± 5	150 ± 5	1450 ± 10	1385 ± 5
48 - 64	400 ± 5	200 ± 5	1640 ± 10	1600 ± 5

Tabel 1. Prøvelegemers dimensioner.

Kærven skal have en dybde d_k , som er givet ved

$$d_k = \frac{1}{2} b \pm 5 \text{ mm}$$

Det anbefales, at kærven saves i våd tilstand, tidligst en dag før prøvningen. Dimensionerne måles med en nøjagtighed på 0,1 mm og 1 mm for henholdsvis tværsnits- og længdedimensioner.

Hvis der anvendes beton med en største stenstørrelse, større end 64 mm, skal b og h forøges proportionalt med stigningen i d_{\max} , og længde og spændvidde forøges svarende til kvadratroden af d_{\max} .

PRAKSIS

Ved instituttet er der opbygget en maskine, hvormed man kan bestemme G_F -værdier for beton. I princippet kan G_F -værdier bestemmes for alle materialer, som har en stor trykstyrke i forhold til trækstyrken. Maskinen er udformet således, at man måler belastninger og deformationer i vandret retning, svarende til at figur 1 er et vandret snit. Fordelen er den, at man nu kan se bort fra tyngdens bidrag til det samlede arbejde, således at

$$G_F = \frac{W_0}{A_{\text{brud}}}$$

Det forudsætter, at bjælken ved prøvningen ikke giver sig til at bøje ud fra det vandrette plan. Derfor monteres der rullejer under bjælken, således at denne kan hvile og bevæge sig uden friktion. Det bemærkes, at kærven stadigvæk skal vende væk fra kraftens angrebslinje, og at bjælkens støbeside skal vende opad.

Udformning

Den detaljerede udformning af maskinen fremgår af en række tegninger, nr. 1-12, som sammen med en tegningsoversigt indgår som bilag.

Tegning nr. 1 viser en plan over rammen til maskinen, hvorpå de øvrige lejer og konsoller er monteret. Rammen er opbygget af HE 200 B stålprofiler, og den er sat på 4 ben udført af HE 100 B stålprofiler. Maskinen er indrettet til at afprøve bjælker med standardlængderne 840 mm og 1190 mm, men da den totale længde er 1600 mm, kan også bjælker med standardlængden 1450 mm afprøves.

Tegning nr. 2 viser en opstalt, hvoraf det fremgår, hvilke konsoller, lejer, beslag m.m. der skal påmonteres til afprøvning af betonbjælker. Maskinen er indrettet til at afprøve bjælker med en højde på 100 mm og en bredde på 100, 141 og 200 mm. En bredde på 141 mm er ikke standardbredde efter RILEM (4). Tegning nr. 2 viser en bjælke med en bredde på 200 mm.

Tegning nr. 3-12 viser, hvorledes de enkelte komponenter er udført. To af de fire konsoller (pos. 1, tegn. 3) er monteret på de yderste stålbjælker, mens de to andre er monteret på den midterste for at bære belastningsarrangementet. Disse to konsoller kan flyttes på den midterste bjælke svarende til betonbjælkens bredde.

På hver betonbjælke er monteret to bærebøjler (pos. 4, tegn. 5), som hviler på hver sin stål-lejeplade (pos. 6, tegn. 6). Kraften på bjælken overføres fra gevindstangen (pos. 11, tegn. 11) gennem en lastcelle (pos. 8) over et trykbeslag (pos. 7, tegn. 7), og deformationen måles på trykbeslaget på den modsatte side (pos. 3, tegn. 4). På selve rammen monteres et beslag, som bærer flytningstransducere.

Til måling af kraften er der anvendt en 10 kN krafttransducer med en nøjagtighed på 1 N og til måling af deformation en flytningstransducer med en nøjagtighed på 0,01 mm. Ved hjælp af passende forstærkere kan kraft- og flytningsværdier udtrykkes i millivoltværdier, som enten kan opsamles på edb og/eller bruges ved optegning på et kurveblad.

Stivhedsberegning

Af tegning nr. 1 fremgår det, at rammen er opbygget af HE200 B profiler. Det er vigtigt at sikre sig, at rammens stivhed er tilstrækkelig stor, og RILEM (4) angiver, at de respektive stivheder for de i tabel 1 angivne bjælkestørrelser er henholdsvis 10, 25, 50 og 150 kN/mm. En beregning af rammens stivhed kan foretages således:

Når betonbjælken påvirkes med en kraft P, betyder det, at de to hovedbjælker hver får en udbøjning givet ved

$$\mu_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \text{ mm}$$

Da kraften P påvirker den langsgående stålbjælke i en afstand l_s fra bjælkens akse, giver det anledning til udbøjning, som kan beregnes efter

$$\mu_2 = \int_0^{l_1} \frac{M_1^2}{EI} dx + \int_0^{l_2} \frac{M_2^2}{EI} dx$$

hvor $M_1 = \frac{P \cdot x}{l_1 + l_2} \cdot l_s$

og $M_2 = \frac{P \cdot x}{l_1 + l_2} \cdot l_s$

Den samlede udbøjning er da $\mu = \mu_1 + \mu_2$, og i de fundne udtryk for μ_1 og μ_2 er

l = understøtningslængden, = 1400 mm

l_s = kraftens angrebsafstand, = 150 mm

l_1, l_2 = længden af de to stykker, som bjælken deles op i, $l_1 = 650$ mm og $l_2 = 150$ mm

E = stålets elasticitetskoefficient = $2,1 \cdot 10^5$ N/mm²

I = inertimomentet af HE200 B profil = $57 \cdot 10^6$ mm⁴

P = 1 N

Det betyder, at

$$\mu_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot 1400^3}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 57 \cdot 10^6} \text{ mm/N} = 2,39 \cdot 10^{-6} \text{ mm/N}$$

og at

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \frac{P^2}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 57 \cdot 10^6} \left[\int_0^{650} \left(\frac{x \cdot 150}{800} \right)^2 dx + \int_0^{150} \left(\frac{x \cdot 150}{800} \right)^2 dx \right] \text{ mm/N} \\ &= 2,937 \cdot 10^{-15} \left[\frac{1}{3} \cdot 650^3 + \frac{1}{3} \cdot 150^3 \right] = 0,27 \cdot 10^{-6} \text{ mm/N} \end{aligned}$$

og dermed at $\mu = 2,39 \cdot 10^{-6} + 0,27 \cdot 10^{-6} = 2,66 \cdot 10^{-6}$ mm/N

eller at stivheden er $\frac{1}{\mu} = \underline{376 \text{ kN/mm}}$.

Det ses, at kravet hermed er opfyldt.

Erfaringer

Ved de første indledende forsøg er der gjort erfaringer, som har bevirket, at der med tiden skal foretages nogle forbedringer.

Det er angivet (4), at betonbjælkens kærve skal saves. Det har ikke været muligt, hvorfor det tillades, at man isætter en kile med en vinkel på $10-15^\circ$ og en bredde i bunden af kilen på mindre end 10 mm. Praksis har vist, at det er vanskeligt at få fjernet denne kile inden prøvningen. Det kan medføre »støj» på kurven, når kilen slipper betonen ved belastningen.

Der er nu anskaffet udstyr til savning af kærve i betonbjælker.

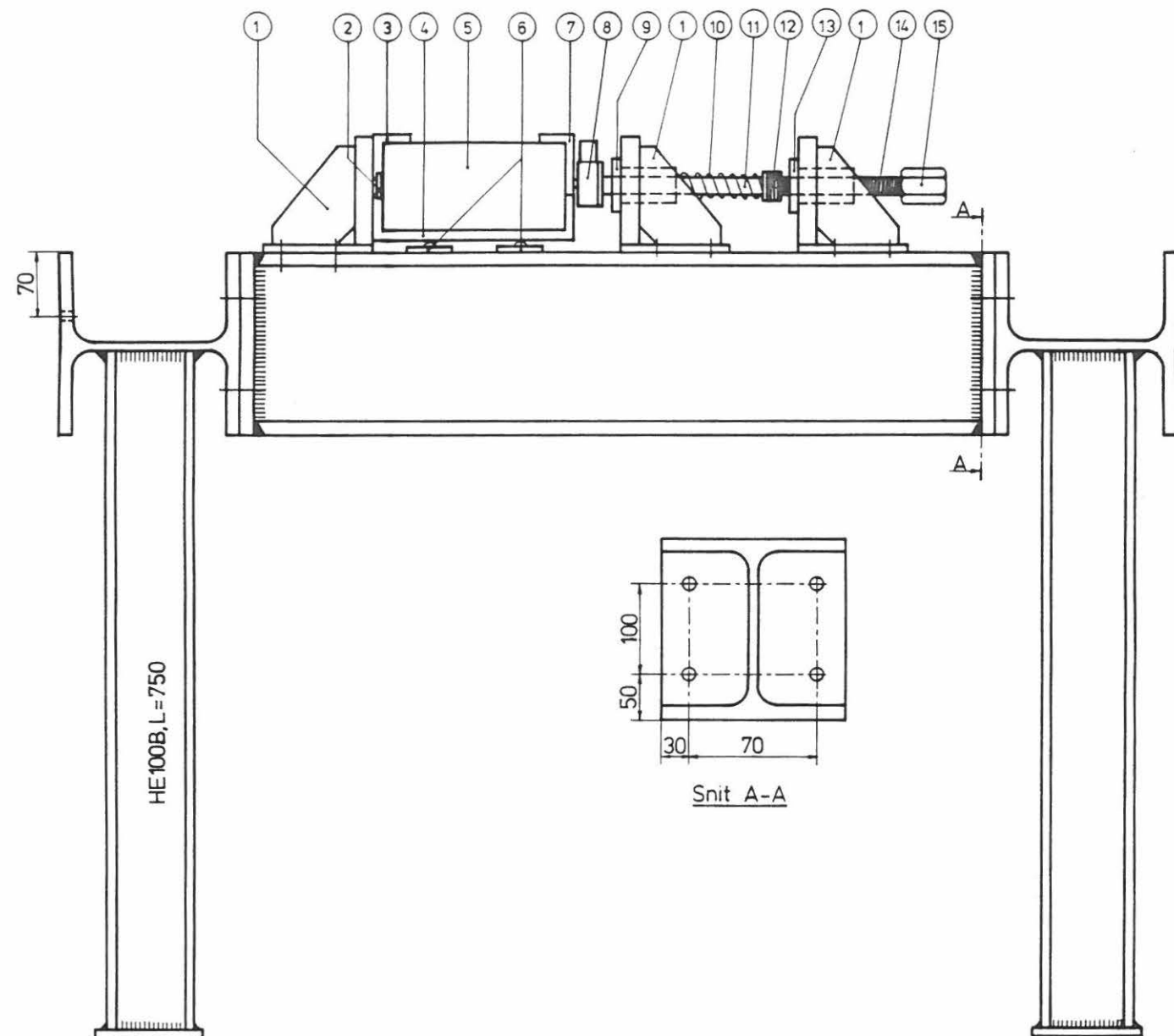
Kraften overføres til bjælken ved at dreje gevindstangen (pos. 14) via møtrikken (pos. 15). Det er meget vigtigt, at kraften overføres ensartet og så langsomt, at toppunktet på kurven (figur 2) nås inden for 30-60 sekunder efter forsøgets start (4). Denne maskine er opbygget således, at aksen skal dreje ca. 1 omgang pr. minut. Hvis man manuelt drejer møtrikken, kan det ikke undgås, at der kommer et stop, og det viser sig ved et »hak» på kurven. Ved montering af et håndsving forbedres forholdene, og der tænkes senere anvendt en jævnstrømsmotor med gear for at sikre en ensartet kraftpåvirkning.

LITTERATUR

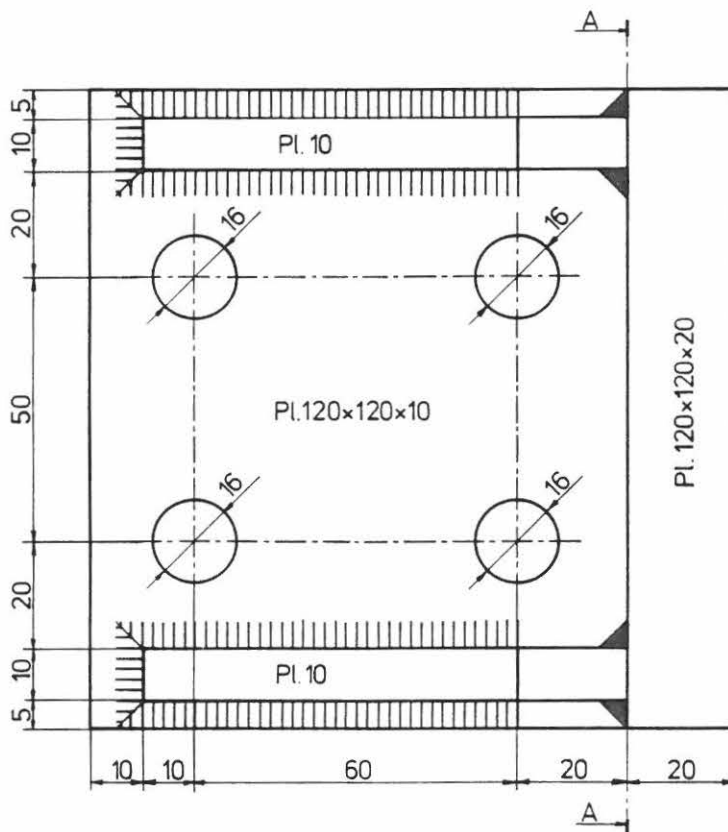
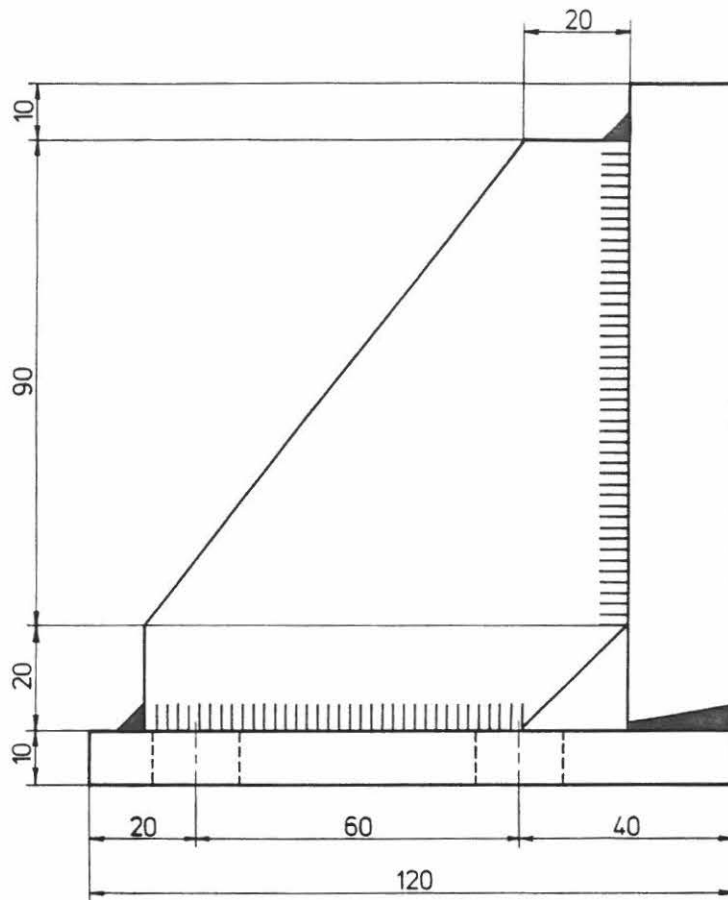
- 1 Hillerborg, A.: The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete.
Materials and Structures, Vol. 18, No. 106, July-August 1985, p. 291-296.
- 2 Hillerborg, A.: Result of three comparative test series for determining the fracture energy G_F of concrete.
Materials and Structures, Vol. 18, No. 107, September-October 1985, p. 407-413.
- 3 Petersson, P. E.: Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials.
Report TVBM - 1006, 1981.
Division of Building Materials, The Lund University of Technology.
- 4 RILEM: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams.
50 - FMC Draft Recommendation.
Materials and Structures, Vol. 18, No. 106, July-August 1985, p. 287-290.

TEGNINGSOVERSIGT

- Nr. 1. Ramme til G_F forsøg. PLAN. 1:5. (71%).
- Nr. 2. Ramme til G_F forsøg. OPSTALT. 1:5. (71%).
- Nr. 3. Ramme til G_F forsøg. KONSOL. 1:1. (71%).
- Nr. 3.1. KONSOL. Målkitser. 1:2.
- Nr. 4. TRYKBESLAG til G_F forsøg. 1:1.
- Nr. 5. BÆREBØJLE til G_F forsøg. 1:1.
- Nr. 6. STÅLLEJEPLADER til G_F forsøg. Mål i mm.
- Nr. 7. TRYKBESLAG til G_F forsøg. 1:1.
- Nr. 8. BÆRING til G_F forsøg. 1:1.
- Nr. 9. AKSEL til G_F forsøg. 1:1.
- Nr. 10. BÆRING til G_F forsøg. 1:1.
- Nr. 11. GEVINDSTANG til G_F forsøg. 1:1.
- Nr. 12. MØTRIK til G_F forsøg. 1:1.

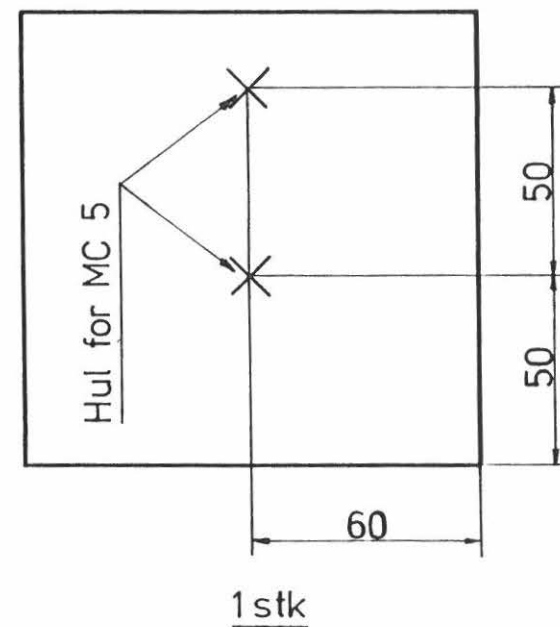
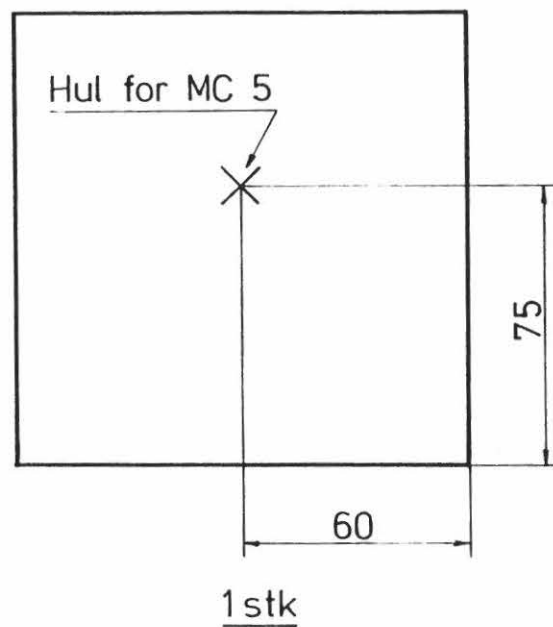
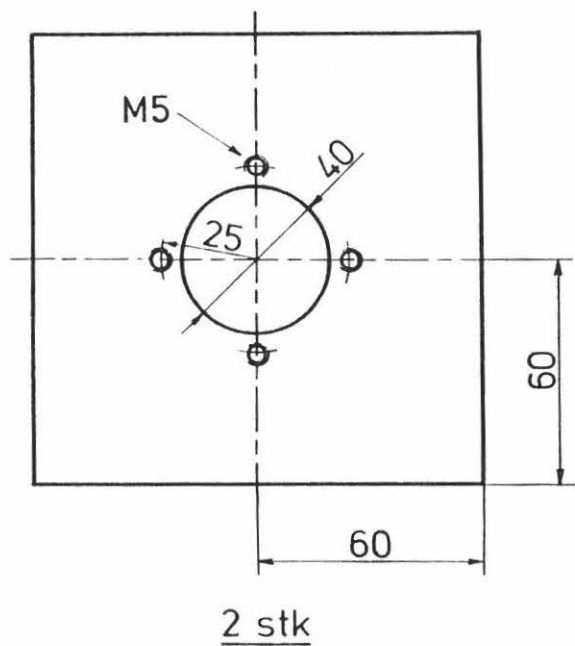


15	1	MØTRIK	Se tegn. nr.12
14	1	GEVINDSTANG	Se tegn. nr.11
13	1	BÆRING	Se tegn. nr.10
12	1	TRYKLEJE $\phi 32$	
11	1	AKSEL	Se tegn. nr. 9
10	1	FJEDER	
9	1	BÆRING	Se tegn. nr. 8
8	1	LASTCELLE - MAX 10kN	
7	1	TRYKBESLAG	Se tegn. nr. 7
6	6	STÅLLEJEPLADER	Se tegn. nr. 6
5		BETONBJÆLKE	
4	2	BÆREBØJLE	Se tegn. nr. 5
3	1	TRYKBESLAG	Se tegn. nr. 4
2	3	LEJE	
1	4	KONSOL	Se tegn. nr. 3
POS	STK		
LABORATORIET FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER			EMNE
AUC - Institut for Bygningsteknik			Ramme til Gf forsøg
Søhrigårdsholmsvej 57 9000 Aalborg			OPSTALT
Telefon: (+85) 142 333			TEGN NR 2
			MAL 1:5
			DATO 22.03.89
			TEGN AF PS

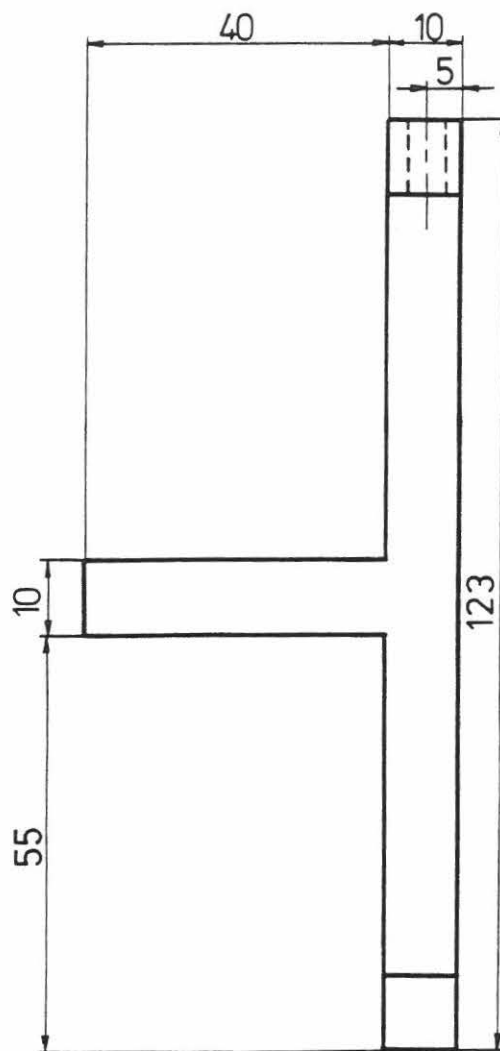
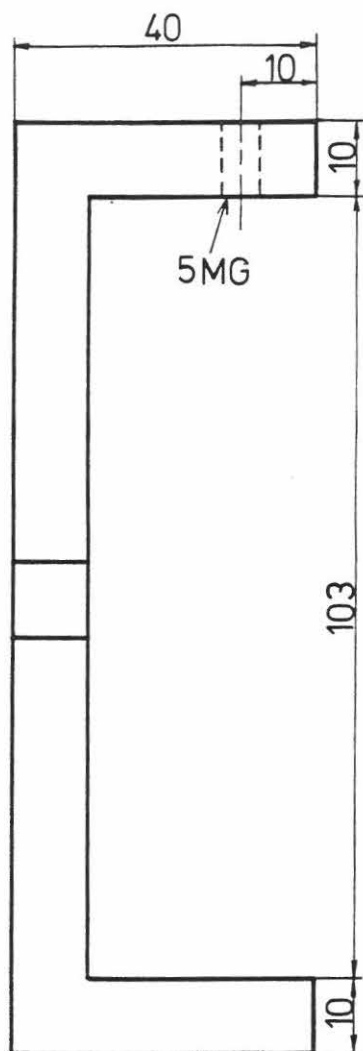


Snit A-A: se tegn nr. 3.1

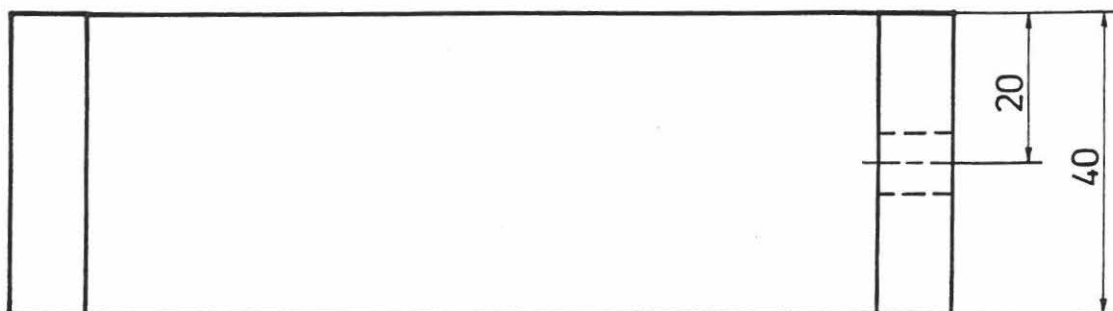
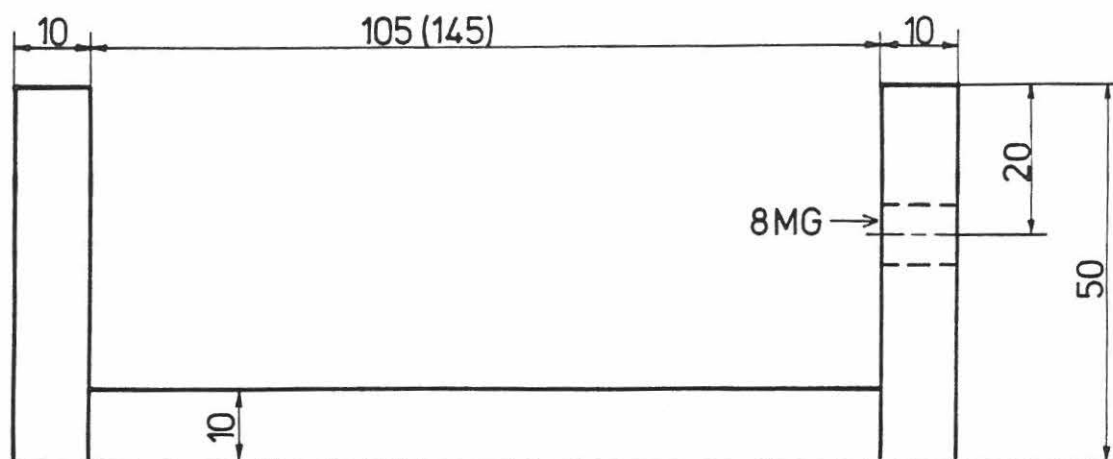
PRO	BY	DIMENSION	MATERIALE
LABORATORIET FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER	EMNE		
AUC - Institutet for Bygningsmekanik	Ramme til G _F forsøg		TEGN NR 3
Sdr. Sandvej 57 8000 Ålborg	KONSOL		MAL 1:1
Tel: 79 12 11 33			DATO 210389
			TEGN AF P.S.



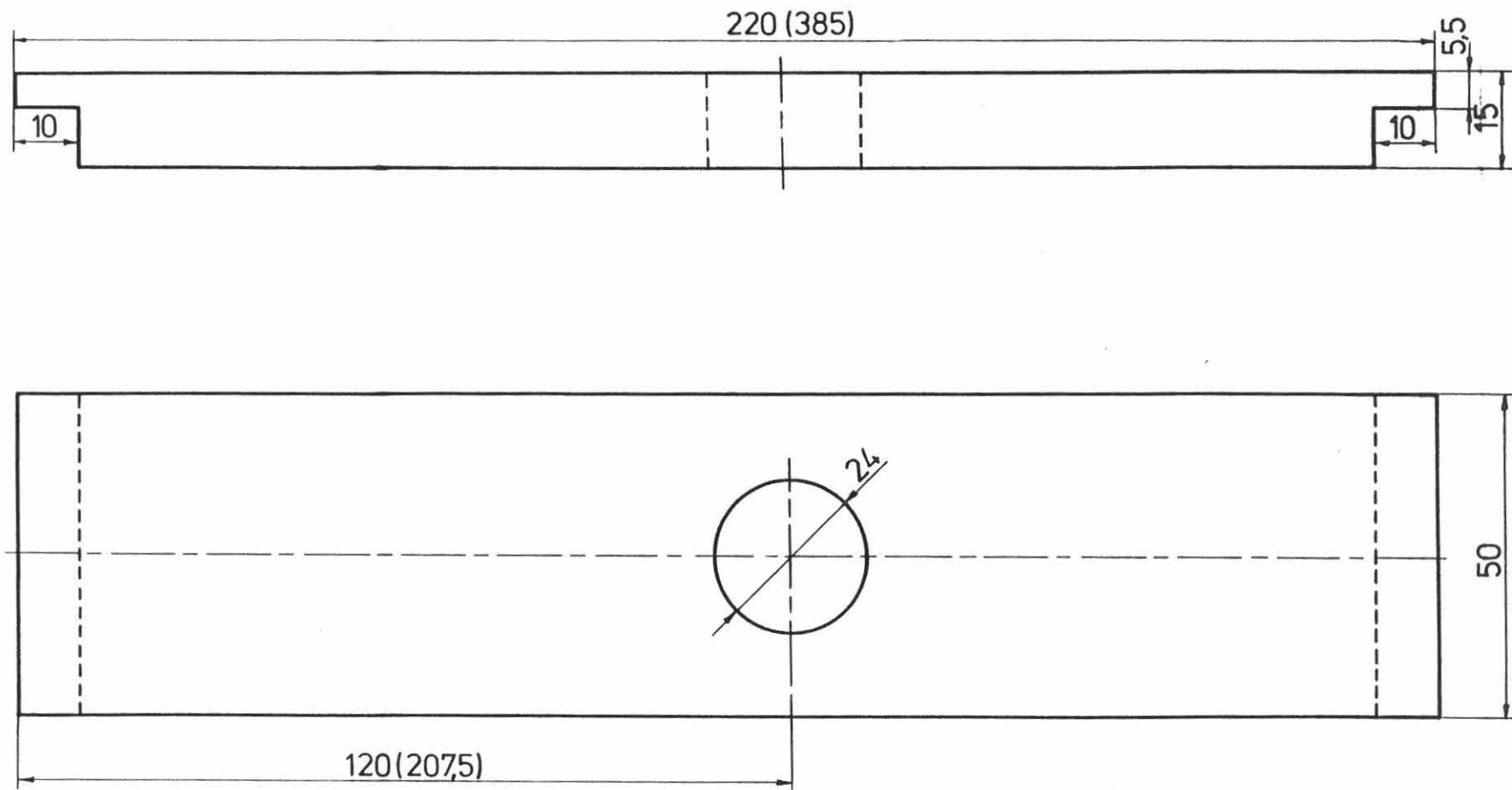
PROJEKT	OBJEKT	DIMENSION	MATERIAL
LABORSTORIELT FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER	EMNE	KONSOL	TEGN. NR. 3.1
Ark. resultater for byggetegning	MÅL	målskitser	1:2
Ark. tegning holdning	DATO	31.05.89	TEGN. AF PS
Ark. tegning holdning	TEGN. AF	PS	



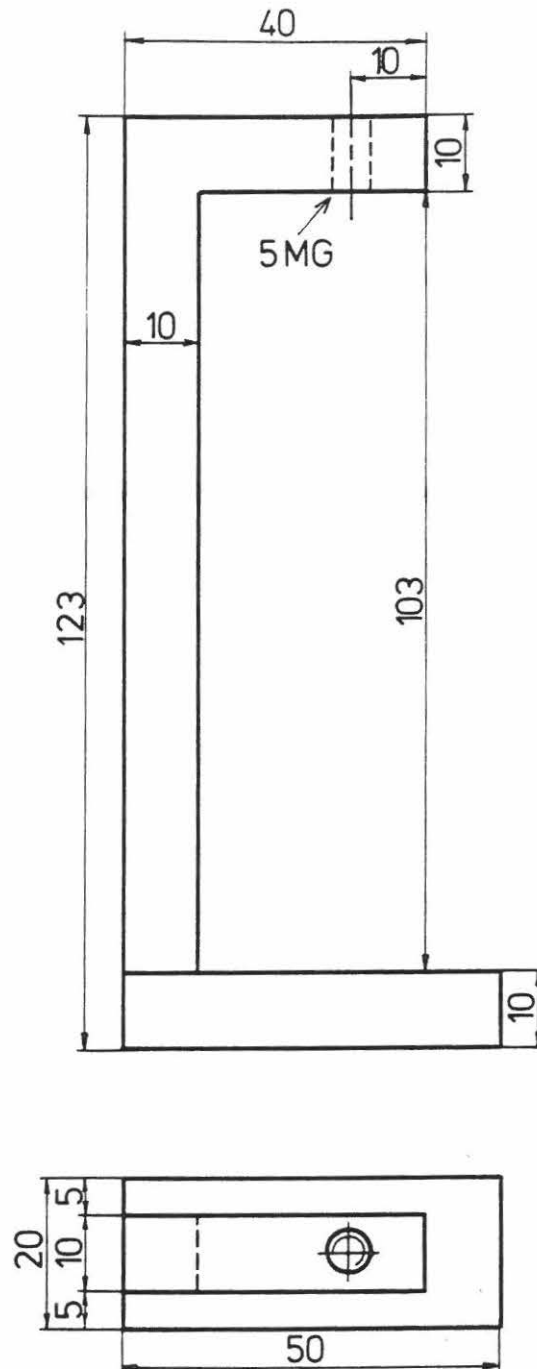
POS	STK	DIMENSION	MATERIALE
LABORATORIET FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER			EMNE
AUC · Institutet for Bygningsteknik			TRYKBESLAG til GF forsøg
Sohngardsholmsvej 57 · 9000 Aalborg			
Telefon (08) 142333			
			TEGN. NR 4
			MÅL 1:1
			DATO 18.05.89
			TEGN. AF PS.



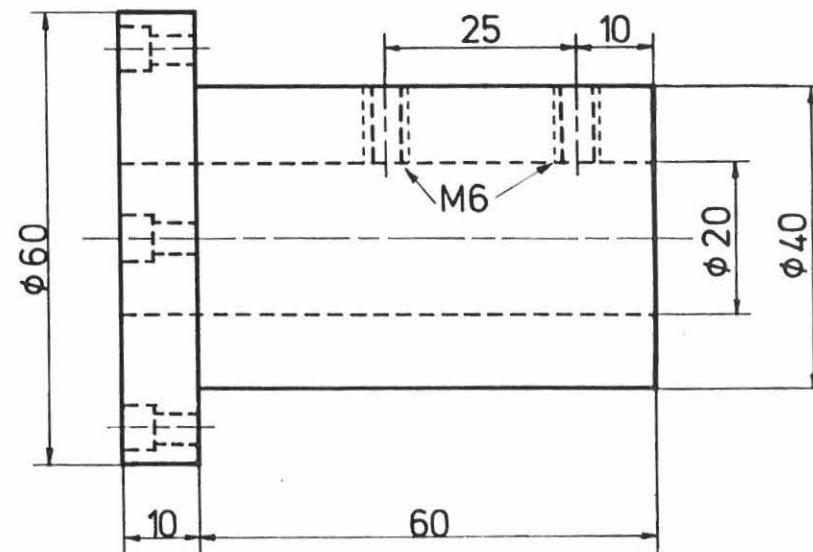
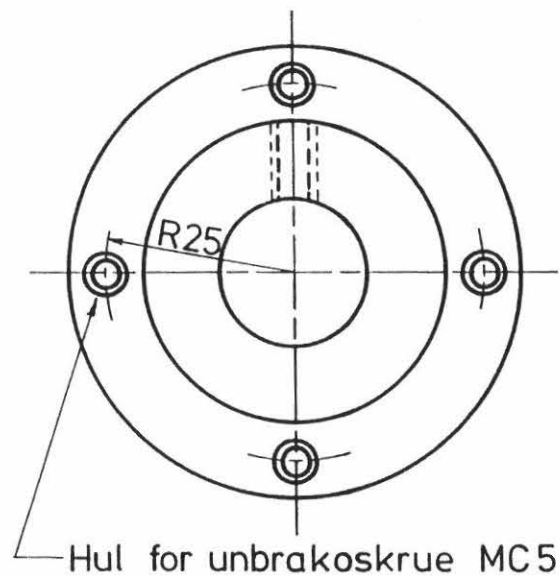
POS.	STK.	DIMENSION	MATERIALE
LABORATORIET FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER			EMNE
AUC · Institutet for Bygningsteknik			BÆREBØJLE til G _F forsøg
Sohngårdsholmsvej 57 · 9000 Aalborg			
Telefon (08) 142333			
			TEGN NR 5
			MAL 1:1
			DATO 18.05.89
			TEGN AF PS.



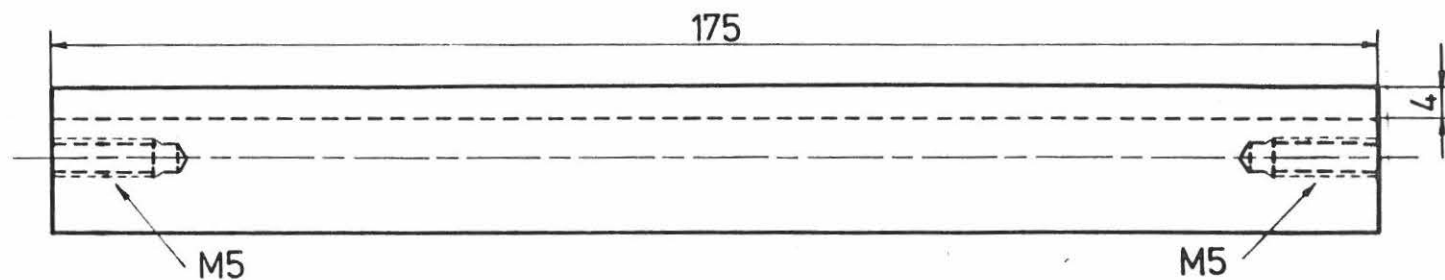
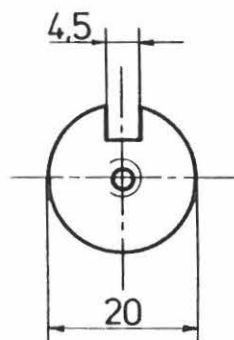
POS	STK	DIMENSION	MATERIALE	
LABORATORIET FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER			EMNE STÅLLEJEPLADER til G _F forsøg	TEGN NR 6
AUC. Instituttet for Bygningsteknik				MAL i mm
Søhngårdsholmsvej 57 9000 Aalborg				DATO 16.05.89
Telefon (08) 142333				TEGN AF P.S.



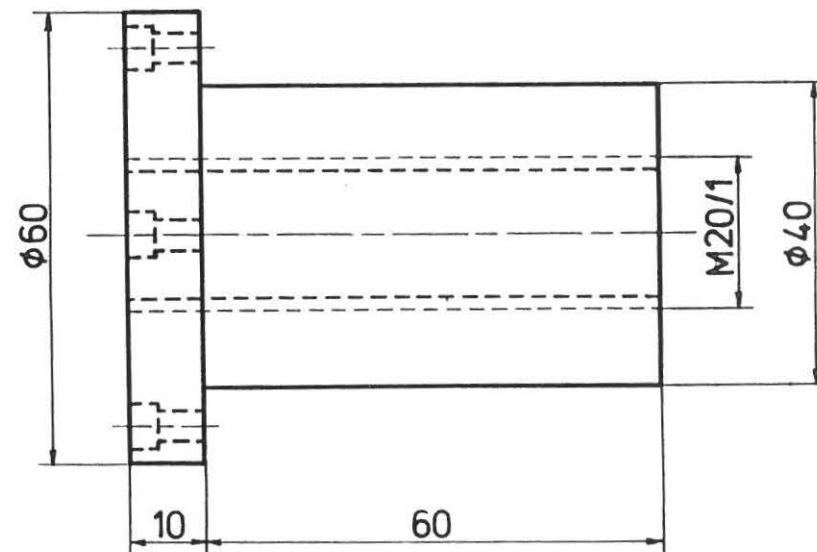
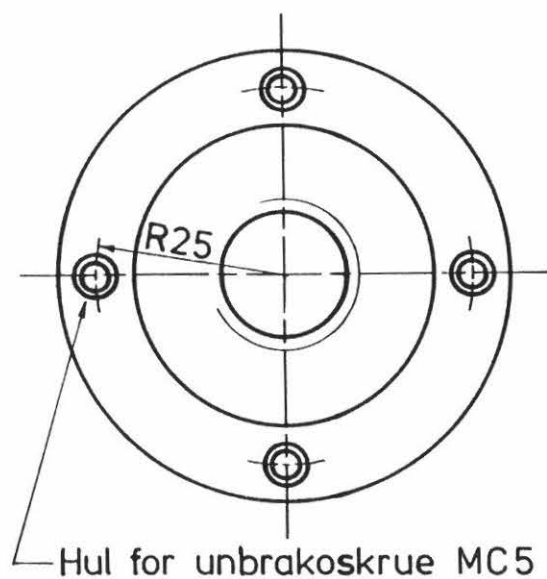
POS.	STK.	DIMENSION	MATERIALE
LABORATORIET FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER			EMNE
AUC · Instituttet for Bygningsteknik			TRYKBESLAG til G_F forsøg
Sohngårdsholmsvej 57 · 9000 Aalborg			
Telefon (08) 142333			
			TEGN. NR. 7
			MÅL 1:1
			DATO 18.05.89
			TEGN. AF P.S.



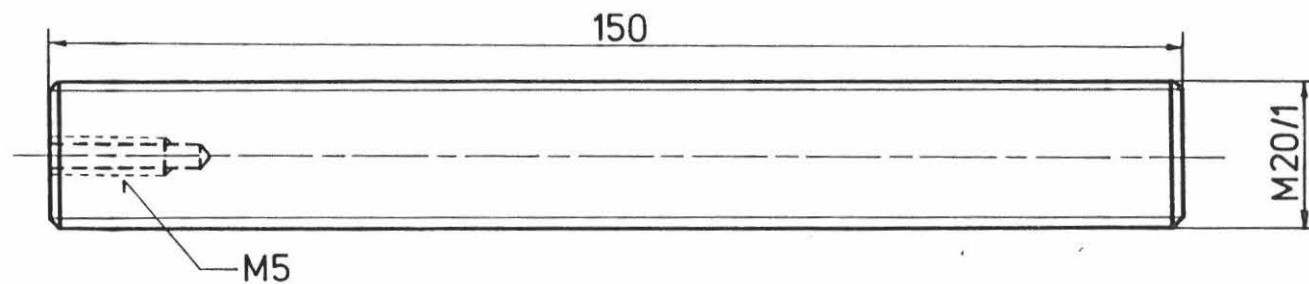
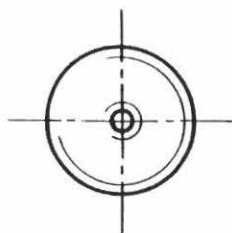
POS	STK	DIMENSION	MATERIALE
LABORATORIET FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER			EMNE
AUC · Instituttet for Bygningsteknik			BÆRING til G _F forsøg
Sohngardsholmsvej 57 · 9000 Aalborg			
Telefon (08) 142333			
			TEGN. NR. 8
			MAL 1:1
			DATO 230589
			TEGN. AF PS



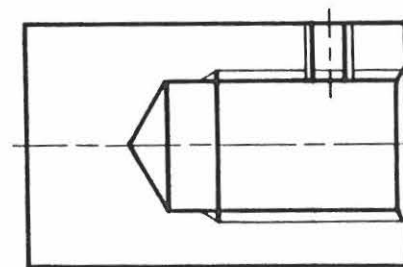
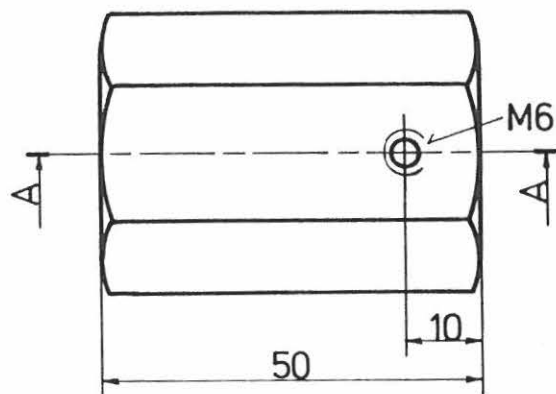
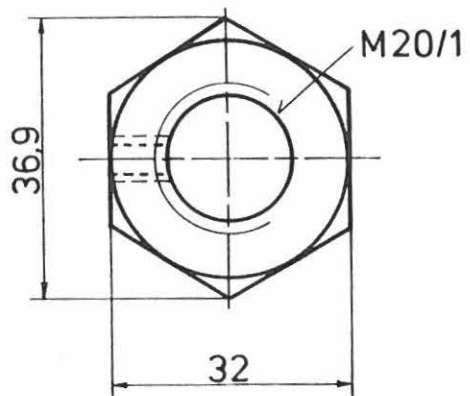
POS	STK	DIMENSION	MATERIALE		
LABORATORIET FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER			EMNE AKSEL til GF forsøg	TEGN NR 9	
AUC - Institutet for Bygningsteknik				MAL 1:1	
Sohngårdsholmsvej 57 - 9000 Aalborg				DATO 30.05.89	
Telefon (08) 142.333				TEGN AF P.S.	



POS	STK	DIMENSION	MATERIALE
LABORATORIET FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER			EMNE
AUC - Institutet for Bygningsteknik			BÆRING til GF forsøg
Sohngardsholmsvej 57 · 9000 Aalborg			
Telefon (08) 142333			
			TEGN NR. 10
			MAL 1:1
			DATO 26.05.89
			TEGN AF P.S.



POS	STK	DIMENSION	MATERIALE	
LABORATORIET FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER AUC - Institutet for Bygningsteknik Sohngardsholmsvej 57 9000 Aalborg Telefon (08) 142333			EMNE	TEGN NR 11
			GEVINDSTANG til GF forsøg	MAL 1:1
				DATO 17.05.89
				TEGN AF P.S.



SNIT A-A

POS	STK	DIMENSION	MATERIALE
LABORATORIET FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER			EMNE
AUC - Instituttet for Bygningsteknik			MØTRIK til GF forsøg
Sohngardsholmsvej 57 · 9000 Aalborg			
Telefon (08) 142333			
			TEGN. NR. 12
			MÅL 1:1
			DATO 17.05.89
			TEGN. AF P.S.

